

Информационные системы и технологии

УДК 621.372

А.А. Власенко, А.А. Трубин, д-р техн. наук

Анализ изменения формы импульсов при их передаче через полосовые фильтры оптических систем связи

Обсуждается проблема искажения формы импульсов при их передаче через мультиплексеры оптических систем связи. Рассматриваются импульсы с прямоугольными и нормальными, а также солитоноподобными и супергауссовскими огибающими. Сформулированы требования, предъявляемые как к самим импульсам, так и фильтрам, а также источникам излучения волоконно-оптических систем связи.

Pulse shape influence at it passing through multiplexers of the optical communication systems is studied. Investigation results of most widespread optical pulse envelope in dependence of it duration, frequency, modulation and so on were studied. Rectangular and normal pulses as well as soliton-like and super-Gaussian pulses were analyzed. It's formulated requirements both to the pulse parameters, filters and to sources of fiber-optic communication systems.

Ключевые слова: гауссовский оптический импульс, супергауссовский импульс, прямоугольный и солитоноподобный импульс, частотная модуляция, полосовой фильтр, микрорезонатор.

Введение

На сегодняшний день волоконно-оптические линии связи позволяют обеспечить наибольшую скорость передачи информации. Для увеличения скорости битового потока в магистральных оптических линиях широко используется метод частотного мультиплексирования, когда каждому каналу выделяется заданная часть полосы частот кабельной линии. В оптических системах связи частотное мультиплексирование каналов называется мультиплексированием по длинам волн (WDM – wavelength-division multiplexing). Для объединения или разделения сигналов по длинам волн применяются различные виды мультиплексеров или демультиплексеров, чаще всего выполняемых на основе дифракционных решеток. Их основным недостатком является невозможность обеспечения нужной избирательности спектральных характеристик, поэто-

му в последнее время все шире начинают использоваться традиционные для более длинноволновых диапазонов (сантиметрового и миллиметрового) мультиплексеры, построенные на основе полосовых фильтров (ПФ), с применением высокодобротных диэлектрических микрорезонаторов с волнами шепчущей галереи [1 – 4].

Постановка задачи

Традиционно, при постановке задачи выбора полос пропускания фильтров, обеспечивающих корректную обработку сигналов, обращают внимание только на отдельные числовые значения параметров их АЧХ. В большинстве случаев, когда речь идет о многоканальной системе передачи, то как правило учитывается только возможность обеспечения необходимого уровня подавления от соседних каналов. При этом проблема влияния фильтров на свойства передаваемых через них импульсов не рассматривается вовсе. Между тем, данный вопрос требует тщательного изучения, т. к. не смотря на то, что по ширине полосы пропускания ПФ и может удовлетворять требованиям передачи с заданной скоростью, сигналы на его выходе могут оказаться неприемлемыми для корректного приема по таким параметрам, как форма, длительность, или задержка во времени.

Поэтому целью настоящей статьи является исследование влияния параметров фильтров, на форму огибающих наиболее часто используемых оптических сигналов.

Для решения поставленной задачи в данной работе предполагается рассчитать характеристики типичного ПФ, найти аналитические соотношения для формы огибающих рассеянных импульсов, исследовать влияние основных параметров системы, обосновать и сформулировать требования, предъявляемые к оптическим импульсам и ПФ.

Пусть на вход ПФ, выполненного на основе N кольцевых микрорезонаторов (рис. 1, а), по волоконно-оптической линии падает импульс с огибающей электрического поля $E_{in}(t)$. При этом на выходе ПФ регистрируется импульс с

огибающей $E_{out}(t)$. Необходимо исследовать форму выходного импульса в зависимости от параметров входного импульса при известных характеристиках ПФ.

Расчетные соотношения

Обратимся вначале к проблеме изменения формы одиночных импульсов при их прохождении через ПФ мультиплексера оптической системы связи.

С этой целью рассмотрим модель оптического фильтра, реализованного, например, на

семи микрорезонаторах ($N = 7$) с волнами шепчущей галереи. Частотные зависимости коэффициентов передачи $20\lg|T(f)|$ и отражения $20\lg|R(f)|$ фильтра, рассчитанные электродинамическим методом, приведенным в работе [5], показаны на рис. 1, б. Основные параметры фильтра таковы: полоса пропускания по уровню затухания минус 3 дБ - 433,8 ГГц; центральная частота - 192,5 ТГц; минимальное затухание - 0,187 дБ; полоса пропускания по уровню минус 30 дБ - 684 ГГц

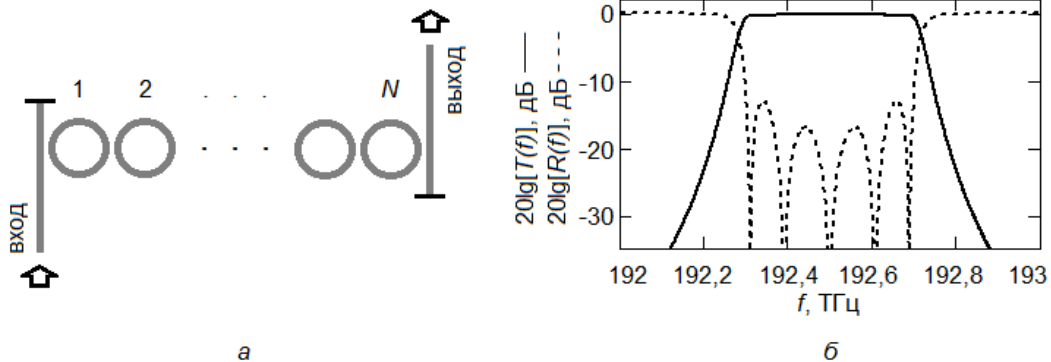


Рис. 1. А – схема полосового оптического фильтра на кольцевых микрорезонаторах; б – амплитудно-частотная характеристика семизвенного фильтра

Исходя из предположения о том, что полоса пропускания с некоторым запасом должна быть несколько большей, чем полоса, занимаемая сигналом, можно сделать вывод о том, что данный фильтр может быть использован для передачи сигналов со скоростью до 400 Гбит/с. Например для синхронного модуля STM-1024 иерархии SDH. При этом можно применить сетку с разносом несущих частот не менее 342 ГГц, например с шагом 400, 500, 600, 1000 ГГц для технологии WDM, или 1250 и 2500 ГГц в случае грубого волнового мультиплексирования CWDM.

Воспользовавшись результатами работы [6], найдем аналитические выражения для формы импульсов на выходе ПФ:

1) с прямоугольной огибающей:

$$E_{in}(t) = \theta(t - t_1) - \theta(t - t_2),$$

$$E_{out}(t) = E_{out}(t, t_1) \cdot \theta(t - t_1) - E_{out}(t, t_2) \cdot \theta(t - t_2), \quad (1)$$

$$E_{out}(t, t_1) = \frac{\omega_0}{1 + 2iQ_D} \sum_{s=1}^N A_s \frac{e^{i(\omega_s - \Omega)(t - t_1)} - 1}{\omega_s - \Omega}, \quad t \in [t_1, \infty),$$

2) с гауссовской огибающей:

$$E_{in}(t) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{1+iC}{2} \left(\frac{t}{\sigma}\right)^2}; \quad (2)$$

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{\sqrt{1+iC}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{i\omega_0\sigma}{1+2iQ_D} \sum_{s=1}^N A_s e^{\frac{z_s^2}{2}} \operatorname{erfc} \left[\frac{z_s(t)}{\sqrt{2}} \right]$$

где $z_s(t) = -\frac{t}{\sigma_c} + i(\Omega - \omega_s)\sigma_c$, $\sigma_c = \frac{\sigma}{\sqrt{1+iC}}$; постоянная C определяет величину частотной модуляции несущей [7]; σ – полуширина импульса;

3) а также солитонно-подобных импульсов с огибающей, изменяющейся по закону гиперболического секанса:

$$E_{in}(t) = \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\sigma}\right);$$

$$E_{out}(t) = \frac{i\omega_0\sigma}{1+2iQ_D} \sum_{s=1}^N A_s e^{i(\omega_s - \Omega)t} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma} e^{i\sigma(\Omega - \omega_s)\xi} \operatorname{sech}\left(\frac{\xi}{\sigma}\right) d\xi; \quad (3)$$

4) с супергауссовской огибающей:

$$E_{in}(t) = e^{-1/2(t/\sigma)^{2m}};$$

$$E_{out}(t) = \frac{i\omega_0\sigma}{1+2iQ_D} \sum_{s=1}^N A_s e^{i(\omega_s - \Omega)t} \times \int_{-\infty}^t e^{i\sigma(\Omega - \omega_s)\xi} \exp\left[-\frac{1}{2}(\xi^{2m})\right] d\xi. \quad (4)$$

Здесь $E_{in} = E_{in}(t)$ определяет временную зависимость электрической компоненты поля огибающей падающего импульса, а $E_{out} = E_{out}(t)$ – зависимость от времени электрической компоненты поля огибающей импульса, прошедшего через полосовой фильтр; параметр m определяет крутизну фронта импульса, а также степень его прямоугольности [7]; $\theta(t)$ – функция Хевисайта; ω_0 – центральная круговая частота фильтра; $Q_D = 1/tg\delta$, $tg\delta$ – тангенс угла потерь материала диэлектрических микрорезонаторов, из которых изготовлен фильтр; а A_s – амплитуды их вынужденных колебаний [5]; ω_s – комплексные частоты связанных колебаний системы микрорезонаторов фильтра; Ω – круговая частота несущей оптического импульса; $erfc(z)$ – функция Гаусса [8]; $i = \sqrt{-1}$.

Результаты вычислений

На рис. 2 приведены результаты расчета по формулам (1) огибающих оптических импульсов прямоугольной формы разной длительности, прошедших через 7-резонаторный полосовой фильтр (рис. 1) с частотой несущей равной центральной частоте полосы пропускания фильтра: $\Omega = \omega_0$.

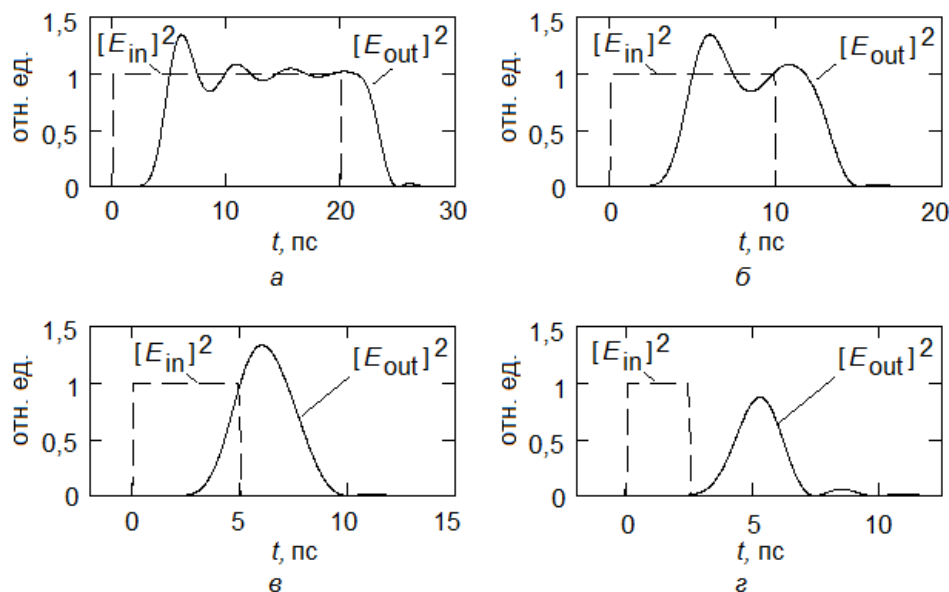


Рис. 2. Изменение формы прямоугольных оптических импульсов после прохождения полосно-пропускающего фильтра, длительностью: а – 20 пс; б – 10 пс; в – 5 пс; г – 2,5 пс

Из приведенных данных следует, что на выходе фильтра наблюдаются импульсы заметно изменившейся формы, которые при уменьшении длительности (а значит, расширении спектра) стремятся к огибающей близкой к гауссовской. Имеются побочные всплески, число и интенсивность которых возрастает с уменьшением длительности импульса (рис. 2, г). И если для одиночного импульса их влияние еще не оказывается таким заметным, то при моделировании последовательности, особенно при увеличении скорости передачи, появление подобных всплесков может существенно изменить интерференционную картину на выходе фильтра, что в этом случае ставит под вопрос возможность их правильного детектирования.

Проведенные расчеты также показывают, что в случае коротких прямоугольных импульсов, временной интервал между ними должен превышать по крайней мере их удвоенную длительность (рис. 3).

Кроме того, за счет перераспределения интенсивности, длительность импульса может уменьшаться, причем тем сильнее, чем выше скорость потока. Так для модуля STM-64 импульс сужается в 1,04 раза. Следует также отметить существенную разницу между амплитудами импульсов, наблюдаемую на выходе фильтра: для скоростей 40 и 160 Гбит/с она уменьшается почти в два раза, а, значит, сокращается эквивалентная протяженность оптического тракта, который можно реализовать без применения оптических усилителей.

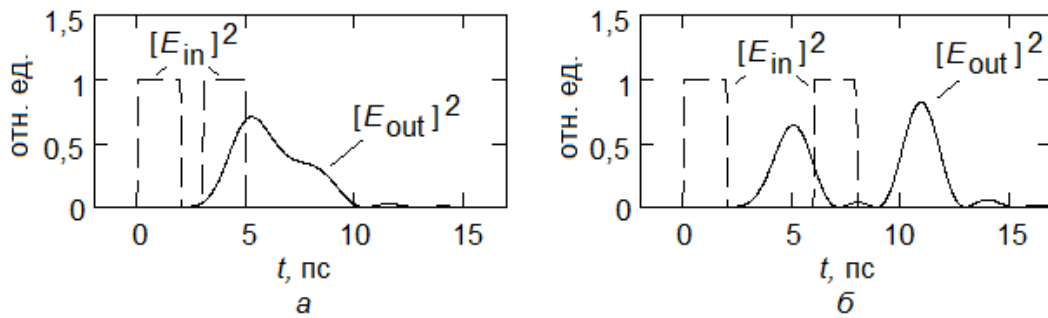


Рис. 3. Взаимное влияние соседних импульсов. Длительность импульсов $\delta t_{\min} = 2$ пс; временной интервал между соседними импульсами: а - $\delta t = 3$ пс; б - $\delta t = 6$ пс

Еще одним важным параметром, требующим подробного рассмотрения, является временная задержка импульса. Сравнивая между собой импульсы потоков STM-256 и STM-1024, наблюдается существенное увеличение задержки. Для передачи обычных данных указанная задержка, вероятно, не будет иметь существенного значения, но в случае, если в потоке присутствует чувствительный к этому параметру трафик, появление ее может существенно сказаться на качестве обслуживания.

На рис. 4 показаны результаты моделирования по формулам (2) оптических импульсов с гауссовскими огибающими при различных значениях частотной модуляции. Как следует из приведенных данных, указанный параметр заметно уменьшает амплитуду импульса в области $|C| > 1$.

Результаты моделирования изменения формы огибающих солитоноподобного и супергауссовского импульсов, полученные по формулам (3), (4), показаны на рис. 5. Обращает на

себя внимание малая величина побочных всплесков солитоноподобных импульсов, а также импульсов с гауссовской огибающей при отсутствии частотной модуляции.

В заключение рассмотрим влияние отклонения средней частоты несущей Ω оптического импульса от центральной частоты ω_0 полосы пропускания фильтра, которая может быть обусловлена нестабильностью генерации источника. Как следует из расчетов, представленных на рис. 6, указанное отклонение несущей сказывается в большей степени на импульсах прямоугольной формы, в то время как импульсы с гауссовской огибающей демонстрируют заметно большую устойчивость по отношению к этому виду возмущений. Вместе с тем, по проведенным вычислениям можно сделать вывод о заметном влиянии нестабильности оптических источников излучения на форму и амплитуду импульсов после прохождения их через каналные фильтры.

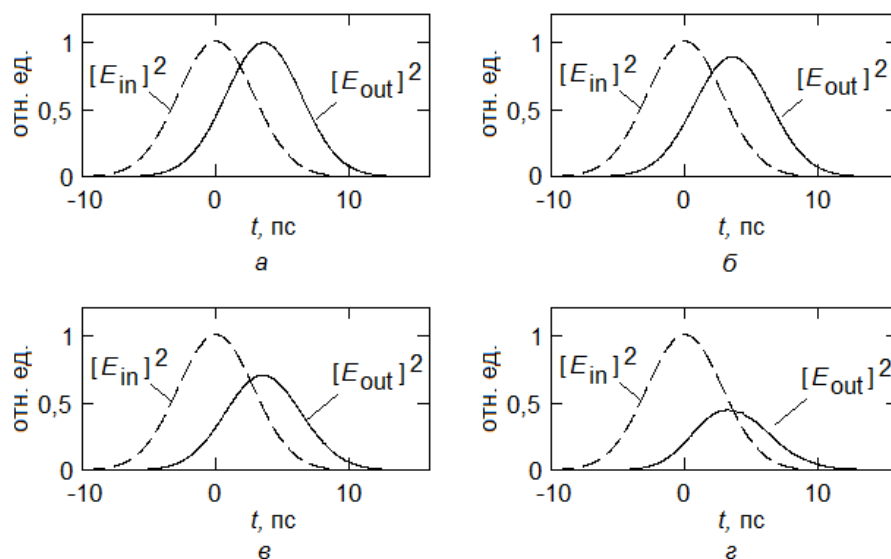


Рис. 4. Изменение формы гауссовских оптических импульсов с $\sigma = 4$ после прохождения полосно-пропускающего фильтра с АЧХ, показанной на рис. 1, б: а - $C = 0$; б - $C = 0,5$; в - $C = 1$; г - $C = 2$

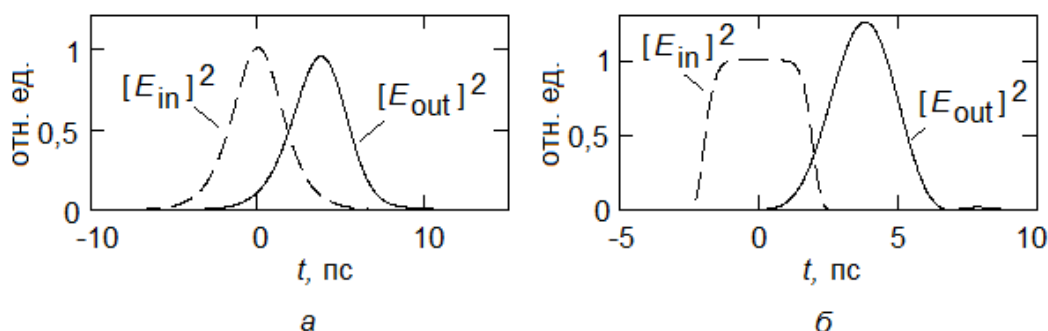


Рис. 5. Изменение формы: а – солитоноподобного импульса ($\sigma = 2$); б – супергауссовского импульса ($\sigma = 2; m = 4$) при прохождении через ПФ

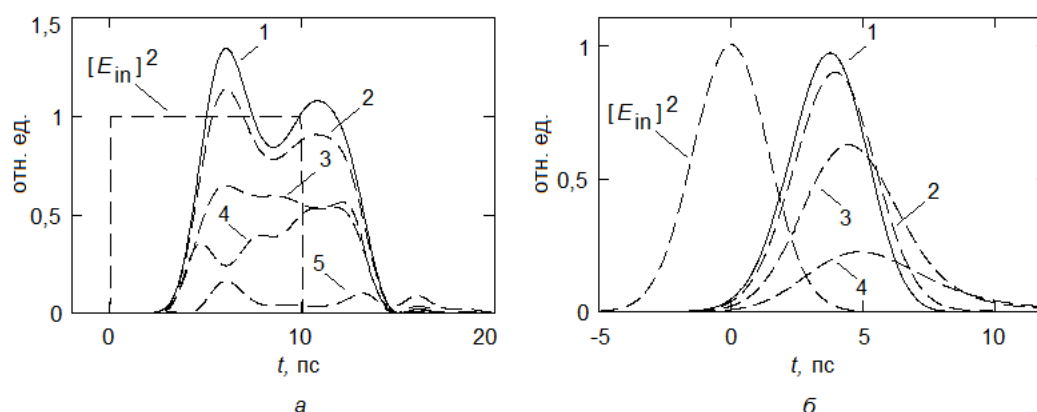


Рис. 6. Влияние отклонения центральной частоты несущей на импульсы: а – прямоугольной формы: 1 – $\Omega = \omega_0$ ТГц; 2 – $\Omega = \omega_0 + 0,1$ ТГц; 3 – $\Omega = \omega_0 + 0,2$ ТГц; 4 – $\Omega = \omega_0 + 0,5$ ТГц; 5 – $\Omega = \omega_0 + 1$ ТГц; б – с гауссовской огибающей ($\sigma = 4; C = 0$): 1 – $\Omega = \omega_0$ ТГц; 2 – $\Omega = \omega_0 + 0,5$ ТГц; 3 – $\Omega = \omega_0 + 1$ ТГц; 4 – $\Omega = \omega_0 + 1,5$ ТГц

Выводы

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующий перечень требований к параметрам оптических импульсов, применяемых в системах связи, использующих волновое мультиплексирование на основе использования полосовых фильтров.

1. Ширина полосы пропускания канального фильтра должна как минимум в 5 – 6 раз превышать обратную величину минимальной длительности передаваемых оптических импульсов δt_{\min} .

2. Отсутствие заметной задержки импульсов на выходе канального фильтра требует по меньшей мере дополнительного удвоения полосы фильтра.

3. Временной интервал между соседними импульсами передаваемого потока не может быть меньшим двух значений минимально допустимой длительности импульсов δt_{\min} .

4. Частотная модуляция импульсов при использовании ПФ в качестве элементов мульти-

плексеров является крайне нежелательной, т. к. ее появление приводит только к уменьшению амплитуды передаваемых сигналов.

5. Величина относительной нестабильности несущей частоты оптического источника сигналов не должна превышать по крайней мере значений 0,01 %.

Соблюдение перечисленных выше условий позволяет обеспечить допустимый уровень искажений и, следовательно, необходимое качество передачи и приема оптических сигналов при использовании мультиплексеров, выполненных на основе системы полосовых фильтров в линейном режиме распространения. Приведенные в работе соотношения для формы огибающих импульсов могут быть использованы в дальнейшем для оптимизации оптических канальных трактов с конкретными параметрами передачи.

Литература

1. *Little B.E., Chu S.T., Haus H. A., Foresi J., Laine J. P.* Microring Resonator Channel Dropping Filters // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 1997. – №16 (6) – P. 998–1005.
2. *Schweib O., Frigyes I.* Vernier operation of series coupled optical microring resonator filters // *Microwave and optical technology letters*. – 2003. – Vol. 39, №4. – P. 257–261.
3. *Hermann A.H., Milos A.P., Michael R.W., Manolatos C.* Optical Resonators and Filters. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 2004. – 36 p.
4. *Xiao S., Khan M.H., Shen H., Qi M.* A highly compact third-order silicon microring add-drop filter with a very large free spectral range, a flat passband dispersion and a low delay // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15. №22. – P. 14765–14771.
5. *Трубин А.А.* Рассеяние электромагнитных волн на системах связанных диэлектрических резонаторов // *Радиоэлектроника*. – 1997. – №2. – С. 35–42.
6. *Трубин А.А.* Розсіювання мікрохвильових пакетів на системах зв'язаних діелектричних резонаторів // *Наукові вісті Національного Технічного Університету України* – 2006. – №2 (46). – С. 18–21.
7. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
8. *Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган.* – М.: Наука, 1979. – 830 с.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Поступила в редакцію 8 декабря 2011 г.